环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第4期
2023年4月15日

目 次

气候变化对中国夏季臭氧影响 …… 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于EOF分解和KZ滤波的2019~2021年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 …… 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 …… 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020年中国城市$PM_{2.5}$-O_3复合污染时空演变特征 …… 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021年京津冀及周边地区$PM_{2.5}$和臭氧复合污染时空特征分析 …… 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020年中国典型经济区$PM_{2.5}$时空变化及其与植被景观格局的关系 …… 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 …… 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 …… 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季$PM_{2.5}$中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 …… 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 …… 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇儇, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季$PM_{2.5}$组分特征及来源解析 …… 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高空间分辨网格的郑州市城镇居民$PM_{2.5}$暴露浓度与健康风险变化评估 …… 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 …… 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020年和2021年南京城区臭氧生成敏感性和VOCs来源变化分析 …… 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气VOCs变化特征及臭氧生成潜势 …… 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间VOCs化学特征及来源解析 …… 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季O_3生成特征 …… 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 …… 李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估 …… 俞珊, 张双, 张增杰, 瞿艳芝, 刘桐珅 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为CO_2排放模拟 …… 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 …… 卓海华, 娄保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 …… 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 …… 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 …… 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 …… 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 …… 张静, 胡愈炘, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 …… 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市3种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因子 …… 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娴, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 …… 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 …… 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒短指软珊瑚(*Sinularia microclavata*)共附生细菌群落结构和功能的影响 …… 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 …… 严棋 (2136)
铝锆改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 …… 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 …… 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳王荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 …… 辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 …… 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于APCS-MLR和PMF模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 …… 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 …… 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于BP神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 … 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 …… 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 …… 邓帅, 段佳辉, 宁墨奂, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤Cd地球化学特征及玉米籽实Cd含量预测 …… 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物Pb、Cd和As污染风险与贡献分析 …… 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素Meta分析和决策树分析 …… 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 …… 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 …… 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 …… 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔鬼箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测 …… 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 …… 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 …… 刘月, 杨树青, 张万锋, 娄帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 …… 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 …… 胡锦辉, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对锑胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 …… 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向2035的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 …… 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 …… 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 …… 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 … 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第4期 2023年4月
Vol.44,No.4 Apr.,2023

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估

赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江*
(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 由于喹诺酮类(QNs)药物在人类医学中的重要性,世界卫生组织将其列为"最重要的抗菌药物". 鉴于此,为阐明土壤中喹诺酮类抗生素时空分布特征及其风险,分别于2020年9月(秋季)和2021年6月(夏季)采集了18份表层土壤样品,并采用高效液相色谱串联质谱法(HPLC-MS/MS)分析测定了土壤样品中的QNs抗生素含量,明晰了QNs时空分布特征及其环境影响因子; 并采用风险商值法(RQ)进行了QNs生态风险和抗性风险评估. 结果表明:① 由2020年9月(秋季)至2021年6月(夏季), QNs含量平均值呈现下降趋势[秋季和夏季ω(QNs)平均值分别为94.88 μg·kg^{-1}和44.46 μg·kg^{-1}]; 中部(S9~S15)土壤中QNs含量最高而其他区域较低; ② 土壤中粉粒平均占比并无显著变化,而黏粒和砂粒平均占比分别呈升高和下降趋势; 总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)和硝氮(NO_3^--N)含量平均值呈下降趋势; ③ 相关分析结果表明,QNs含量与土壤粒径、亚硝氮(NO_2^--N)和硝氮(NO_3^--N)等3种理化因子显著相关($P<0.05$); ④ QNs的联合生态风险为高风险水平($RQ_{sum}>1$),而联合抗性风险为中风险水平($0.1<RQ_{sum}\leq1$),且均呈下降趋势. 石家庄市土壤中QNs的生态风险和抗性风险应引起关注,需加强石家庄市土壤中抗生素的风险管控.

关键词:喹诺酮类(QNs); 土壤; 时空分布; 影响因子; 生态风险; 抗性风险; 抗生素
中图分类号: X53; X820.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)04-2223-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202204266

Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City

ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, SONG Yuan-meng, LU Meng-qi, CUI Jian-sheng, ZHANG Lu-lu, LI Shuang-jiang*
(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Due to their importance in human medicine, quinolones (QNs), as a typical class of antibiotics, are considered to be the "highest priority critically important antimicrobials" by the World Health Organization (WHO). In order to clarify the spatial-temporal variation and risk of QNs in soil, 18 representative topsoil samples were respectively collected in September 2020 (autumn) and June 2021 (summer). The contents of QNs antibiotics in soil samples were determined using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS), and the ecological risk and resistance risk were calculated using the risk quotient method (RQ). The results showed that: ① the average content of QNs decreased from autumn to summer (the average contents of QNs were 94.88 μg·kg^{-1} in autumn and 44.46 μg·kg^{-1} in summer); the highest values appeared in the middle area. ② The average proportion of silt was without change, whereas the average proportion of clay and sand was increased and decreased, respectively; the average contents of total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH_4^+-N), and nitrate nitrogen (NO_3^--N) also decreased. ③ The content of QNs was significantly correlated with soil particle size, nitrite nitrogen (NO_2^--N), and nitrate nitrogen (NO_3^--N) ($P<0.05$). ④ The combined ecological risk of QNs showed high risk level ($RQ_{sum}>1$), whereas the combined resistance risk of QNs showed medium risk level ($0.1<RQ_{sum}\leq1$). In terms of seasonal variation, RQ_{sum} showed a downward trend. Overall, the ecological risk and resistance risk of QNs in soil for Shijiazhuang City require further attention, and the risk control of antibiotics in soil should be strengthened in the future.

Key words: quinolones (QNs); soil; temporal and spatial distribution; influencing factors; ecological risk; resistance risk; antibiotics

抗生素主要包括:β-内酰胺类(β-lactams)、四环素类(tetracyclines, TCs)、喹诺酮类(quinolones, QNs)、磺胺类(sulfonamides, SAs)和大环内酯类(macrolides antibiotics, MLs). 近70年来,抗生素被广泛应用于人类和动物疾病治疗,并作为生长促进剂应用于畜禽养殖. 据估算,从2010~2030年,全球抗生素使用量将增加63%[1]. 由于抗生素无法被生物体有效吸收,约30%~90%的抗生素会随尿液或粪便排出体外[2],最终经污水(废水)直排、固体废弃物、污水灌溉和粪肥施用等途径进入土壤中并进行吸附累积[3]. 其中,QNs作为一类人畜通用的抗菌药物,在2013年的国内使用量达2.73万t[4]. QNs在土壤中吸附分配系数(K_d)较高,会在土壤中持久存在并造成潜在生态风险. 如:QNs在土壤中的K_d为160.7~786.1 L·kg^{-1},而SAs在土壤中K_d仅为3.17~7.89 L·kg^{-1}[5]. 近年来,我国土壤中QNs检出水平(0~1 527 μg·kg^{-1})高于土耳其[恩诺沙星(enrofloxacin, ENR):20~50 μg·kg^{-1}]、印度[诺氟沙星(norfloxacin, NOR): <11 μg·kg^{-1}]和瑞士[环丙沙星(ciprofloxacin, CIP):270~400 μg·kg^{-1}]

收稿日期: 2022-04-22; **修订日期**: 2022-07-10
基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2019208152); 河北省教育厅重点项目(ZD2021046); 河北省重点研发计划项目(21374001D)
作者简介: 赵鑫宇(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤中抗生素污染治理及风险防控, E-mail:zhaoxinyu_1206@163.com
* 通信作者, E-mail:ajiaer@163.com

等[6,7]. 尽管如此,目前我国有关土壤中抗生素的研究仍集中于 TCs 和 SAs,对土壤中 QNs 污染特征和风险的研究较少.

抗生素在土壤中的吸附与抗生素种类、土壤组分和土壤理化性质密切相关[8]. 如:黏粒含量会影响土壤对泰乐菌素的吸附量[9]; pH 会影响 NOR 在土壤中的吸附解吸[10]; 金属离子会影响抗生素在土壤中的含量[11,12]等. 其中 pH 通过影响土壤颗粒表面阳离子交换能力和抗生素电离程度从而影响土壤对抗生素的吸附[13,14]; 重金属离子通过与抗生素阳离子竞争吸附位点从而抑制抗生素的吸附[11]; 而土壤中有机质可通过其自身的离子交换和氧化还原等特性与抗生素发生交互作用[15],如 Pan 等[16]通过研究发现 OFL 与有机质含量呈显著正相关(P <0.01). 但目前研究较少关注总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)和亚硝氮(NO_2^--N)等理化因子对抗生素吸附的影响. 抗生素在土壤中不断吸附累积并持久存在[17],最终会抑制植物或农作物的生长[18,19]、影响土壤动物的生理特性[20]以及改变土壤微生物的结构和功能[21,22]. 此外,环境中抗生素的选择压力可导致抗性基因的产生并加速耐药性病原体的传播[23~28]. 当环境中抗生素浓度超过抗性选择的预测无效应浓度时,微生物群落会产生一定的抗性. 但目前对土壤中抗生素的风险评估并未考虑抗性风险.

石家庄市作为华北地区重要的医药产业基地,集聚了河北省 90% 以上的医药资源,拥有包括华北制药(国内最大化学制药企业和抗生素生产基地之一)和石药(国内最大化学原料药生产基地之一)在内的 200 余家生物医药企业[29],产品种类多达2 000 余种,其中抗生素产量居国内领先水平[30]. 然而,目前对石家庄市土壤中典型抗生素 QNs 时空分布特征及其风险的研究仍未见报道. 因此,本文以石家庄市为研究区,分别于 2020 年 9 月(秋季)和 2021 年 6 月(夏季)采集表层土壤样品,明晰在石家庄市土壤中 QNs 含量的时空变化规律及其主要环境影响因子,并采用风险商值法(RQ)对其潜在的生态风险和抗性风险进行评估,以期为石家庄市土壤中抗生素风险管控提供数据和方法支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

石家庄市地处河北省中南部(总面积为14 464 km^2),地势西北高而东南低,气候为温带季风气候,年总降水量达 401 ~752 mm. 当地制药企业较为发达,2020 年石家庄市医药工业增长 19.1%,涨幅显著高于其他行业. 其中 5 大产业园区中有三大产业园区集中分布于石家庄市中部地区[31]. 综合考虑空间方位、地形和土地利用等因素,在石家庄市的北部、中部和南部共布设 18 个采样点(图 1),并于 2020 年 9 月和 2021 年 6 月采集了 0 ~25 cm 的表层土壤样品. 将去除较大杂质的土壤样品密封保存并运送回实验室,并于 -20℃进行低温冷冻保存直至分析,将样品分为两份,其中一份用于抗生素的分析测定,另一份用于理化因子的测定.

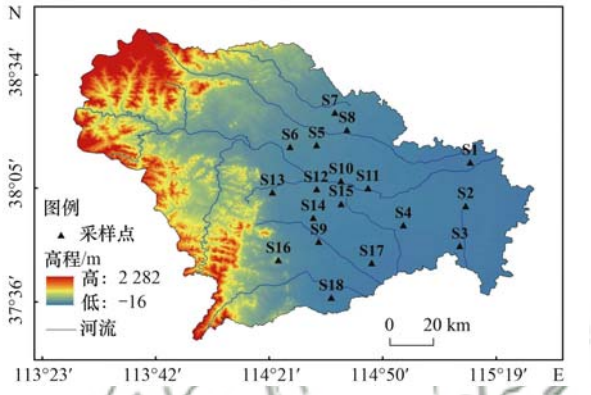


图 1 石家庄市采样点的分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Shijiazhuang City

1.2 理化因子的测定

用于理化因子测定的土壤样品解冻后,取出 20 g 新鲜土壤样品,将其风干后进行研磨,并过 40 目筛,使用 LE400-05(USA)粒径分析仪测定土壤粒径. 将剩余的土壤样品均匀分为两份,一份用于测定土壤样品中的 TP 含量,另一份用于测定土壤样品中的NH_4^+-N、NO_3^--N和NO_2^--N含量,具体方法参照标准 HJ 632-2011 和标准 HJ 634-2012.

1.3 抗生素的分析测定方法

1.3.1 样品预处理

使用锡箔纸将用于 QNs 测定的冷冻土壤样品包裹、扎孔后转移至托盘中,放置冷冻干燥机中,在 -80℃条件下进行冷冻干燥 3 ~4 d,冻干后的样品使用搅碎机进行粉碎并过 40 目筛,过筛后将其密封冷冻保存至分析. 称取 2 g 处理后的土壤样品装入 34 mL 萃取池中,称取 2 g 使用乙二胺四乙酸二钠(Na_2EDTA)溶液淋洗处理过的硅藻土与样品进行 1∶1充分混合,以乙腈-磷酸盐缓冲液(pH = 3)作为萃取液,使用 ASE 350 快速溶剂萃取仪(Thermo, Germany)进行萃取. 萃取后的溶液使用平行浓缩蒸发仪(Buchi, Switzerland)浓缩至体积小于或等于 1 mL,转移至锥形瓶中,稀释 200 倍制成试料[32].

1.3.2 QNs 的测定

将试料过 0.45 μm 滤膜,加入 2 g 螯合剂(Na_2EDTA),并使用 1 $mol \cdot L^{-1}$ H_2SO_4 溶液将试料

的 pH 调节为 3.0. 依次使用 6 mL 纯甲醇溶液和 6 mL 超纯水活化固相萃取柱(InertSep HLB,岛津),活化完成后在负压条件下进行固相萃取,然后对固相萃取柱抽真空干燥 10 min,并依次用 10 mL 超纯水和 10 mL 的甲醇水溶液(体积分数为 5%)进行淋洗,用 6 mL 的氨水甲醇溶液(体积分数为 2%)和 6 mL 纯甲醇溶液进行洗脱,将洗脱液收集至试管中,并使用氮吹仪将洗脱液氮吹至近干(40℃条件下),最后使用甲醇水溶液(体积比为 1∶1)定容至 1 mL,超声 10 min 后过 0.22 μm 滤膜,转移至棕色玻璃瓶,最后使用高效液相色谱-三重四极杆质谱联用仪(HPLC-MS/MS)测定样品中 QNs 的含量,仪器具体操作条件参考文献[33]. 14 种 QNs 标准品: PIP (pipemidic acid)、MAR (marbofloxacin)、FLE (fleroxacin)、OFL (ofloxacin)、ENO (enoxacin)、NOR (norfloxacin)、CIP (ciprofloxacin)、ENR (enrofloxacin)、ORB (orbifloxacin)、DIF (difloxacin)、SAR (sarafloxacin)、SPA (sparfloxacin)、OXO (oxolinic acid) 和 FLU (flumequine),购自 Sigma-Aldrich (steinheim, Germany),试剂均属分析纯.

1.4　抗生素风险评估方法

1.4.1　QNs 生态风险评估

抗生素的生态风险常采用风险商值法(RQ)来进行计算,本研究拟采用联合风险商(RQ_{sum})来表征抗生素的生态风险,具体计算方法见公式(1) ~ (4)[34~36]. 且根据 RQ 值大小具体可分为 3 个等级,即: RQ≤0.1(低风险),0.1 < RQ≤1(中风险)和 RQ >1(高风险). 其中 5 种 QNs 的生态风险参数见表 1.

$$PNEC_{water} = EC_{50}(LC_{50})/AF \quad (1)$$

$$PNEC_{soil} = PNEC_{water} \times K_d \quad (2)$$

$$RQ = MEC/PNEC_{soil} \quad (3)$$

$$RQ_{sum} = \sum RQ \quad (4)$$

式中,EC_{50}表示半最大效应质量浓度,LC_{50}表示半致死质量浓度,$mg \cdot L^{-1}$. AF 表示评价因子,采用急性毒性数据进行评估时常取值1 000[37]. $PNEC_{water}$表示抗生素在水中的预测无效应浓度, $\mu g \cdot L^{-1}$. $PNEC_{soil}$表示抗生素在土壤中的预测无效应含量, $\mu g \cdot kg^{-1}$. K_d 表示土壤-水分配系数,$L \cdot kg^{-1}$. 由于不同研究中 K_d 值差异显著,为更科学地进行评估,本研究采用文献[38~45]中 K_d 值的平均值进行风险商值的计算. MEC 表示抗生素的实测含量, $\mu g \cdot kg^{-1}$. 其中 EC_{50}(LC_{50})主要从美国生态毒理数据库 ECOTOX 中获取. 且由于毒理研究多以水作为介质,因此 $PNEC_{soil}$采用公式(2)换算得到. 为最大化抗生素的生态风险,选用最为敏感的蓝绿藻属(铜绿微囊藻)作为敏感物种. 联合风险商(RQ_{sum})为各 QNs 的风险值之和.

表 1　5 种典型 QNs 的生态风险参数[1)]

Table 1　Ecological risk parameters of five typical QNs

QNs	敏感物种	EC_{50}(LC_{50}) /$mg \cdot L^{-1}$	AF	K_d 平均值 /$L \cdot kg^{-1}$	$PNEC_{water}$ /$\mu g \cdot L^{-1}$	$PNEC_{soil}$ /$\mu g \cdot kg^{-1}$
OFL	铜绿微囊藻	0.021	1 000	1 291	0.021	27.11
NOR	铜绿微囊藻	0.062	1 000	523	0.062	32.43
CIP	铜绿微囊藻	0.017	1 000	691	0.017	11.75
ENR	铜绿微囊藻	0.049	1 000	844	0.049	41.36
FLU	铜绿微囊藻	0.159	1 000	1 498	0.159	238.2

1) EC_{50}(LC_{50})数据来源于数据库 ECOTOX

1.4.2　QNs 抗性风险评估

Bengtsson-Palme 等[46]通过评估因子 10 评估得到抗性选择的预测无效应浓度($PNEC^*_{water}$,表 2),即抗生素的最低选择性浓度. 本研究拟采用风险商值法(RQ)并通过公式(4) ~ (6)可计算得到土壤中 QNs 的联合抗性风险.

$$PNEC^*_{soil} = PNEC^*_{water} \times K_d \quad (5)$$

$$RQ = MEC/PNEC^*_{soil} \quad (6)$$

表 2　5 种典型 QNs 的抗性风险参数

Table 2　Resistance risk parameters of five typical QNs

抗性风险参数	OFL	NOR	CIP	ENR	FLU
$PNEC^*_{water}$/$\mu g \cdot L^{-1}$	0.50	0.50	0.064	0.064	0.25
$PNEC^*_{soil}$/$\mu g \cdot kg^{-1}$	645.5	261.5	44.22	54.02	374.5

1.5　质量控制

采用外标法进行定量分析. 使用甲醇水溶液(体积比为 1∶1)稀释 1 $mg \cdot L^{-1}$的标准储备液,制备浓度梯度的系列标准溶液,经 HPLC-MS/MS 分析测定后,得到抗生素质量含量与峰面积的标准曲线(相关系数均大于 0.99). 使用空白加标和平行样品

加标以测定加标回收率,空白样品不含 QNs,所测得加标回收率介于 70.1%~94.5%之间.

1.6 数据处理与统计

使用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行数据统计,利用 Pearson 分析进行环境因子与 QNs 之间相关性分析. 使用 ArcGIS 10.6 软件绘制采样点图和 QNs 含量的空间分布. 使用 Origin 2018 软件绘制生态风险和抗性风险热图及环境因子的柱状分布图.

2 结果与分析

2.1 石家庄市土壤中典型 QNs 的时空分布特征

石家庄市土壤中 14 种 QNs 在秋季(2020 年 9 月)和夏季(2021 年 6 月)的检出率和检出含量见表 3. 就检出率而言,秋季检出率较高的 QNs 分别为 OFL(72.22%)、NOR(83.33%)、CIP(66.67%)、OXO(66.67%)和 FLU(94.44%);而夏季检出率较高的 QNs 分别为 FLE(66.67%)、OFL(96.67)、NOR(100.0%)、CIP(96.67%)、ENR(100.0%)、OXO(100.0%)和 FLU(88.89%). 其中 10 种 QNs 在夏季的检出率高于秋季. 就检出含量而言,秋季 ω(NOR)平均值最高(62.30 $\mu g \cdot kg^{-1}$),而 ω(SPA)平均值最低(0.182 $\mu g \cdot kg^{-1}$);夏季 ω(NOR)平均值最高(19.11 $\mu g \cdot kg^{-1}$),而 ω(OXO)平均值最低(0.062 $\mu g \cdot kg^{-1}$). 其中 9 种 QNs 在秋季的检出含量平均值高于夏季.

表 3 石家庄市土壤中 14 种 QNs 的检出率和检出含量[1)]

Table 3 Detection rate and content of 14 QNs in soil of Shijiazhuang City

QNs	2020-09(秋季)				2021-06(夏季)			
	检出率/%	平均值/$\mu g \cdot kg^{-1}$	最小值/$\mu g \cdot kg^{-1}$	最大值/$\mu g \cdot kg^{-1}$	检出率/%	平均值/$\mu g \cdot kg^{-1}$	最小值/$\mu g \cdot kg^{-1}$	最大值/$\mu g \cdot kg^{-1}$
PIP	27.78	2.274	0.300	5.483	33.33	2.895	1.852	3.828
MAR	11.11	25.69	21.19	30.19	5.560	1.717	1.717	1.717
FLE	11.11	0.379	0.214	0.545	66.67	0.355	0.279	0.588
OFL	72.22	3.461	0.081	10.91	96.67	2.316	0.024	12.09
ENO	50.00	1.556	0.147	4.832	61.11	8.933	6.971	13.24
NOR	83.33	62.30	10.97	204.0	100.0	19.11	4.211	82.54
CIP	66.67	34.56	1.308	264.7	96.67	12.14	7.028	20.47
ENR	44.44	9.045	1.040	23.29	100.0	3.373	1.457	7.268
ORB	—	—	—	—	—	—	—	—
DIF	22.22	0.522	0.118	1.300	44.44	0.481	0.225	0.907
SAR	11.11	0.327	0.240	0.415	61.11	2.478	1.214	5.568
SPA	5.560	0.182	0.182	0.182	—	—	—	—
OXO	66.67	0.516	0.291	0.906	100.0	0.062	0.031	0.102
FLU	94.44	9.101	0.840	18.72	88.89	0.375	0.177	0.655

1)"—"表示未检出

就 QNs 时空分布特征而言,选择检出率较高且较常见的 5 种 QNs 作为研究对象,研究其时空分布特征(见图 2). 从 2020 年 9 月至 2021 年 6 月,ω(OFL)、ω(NOR)、ω(CIP)、ω(ENR)、ω(FLU)和 ω(总 QNs)平均值均呈降低趋势,分别由 3.461、62.30、34.56、9.045、9.101 和 94.88 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 降低为 2.316、19.11、12.14、3.373、0.375 和 44.46 $\mu g \cdot kg^{-1}$. 可能是由于夏季降水量较高,雨水冲刷和地表径流导致表层抗生素含量降低. 整体而言,石家庄市土壤中 ω(总 QNs)平均值在中部地区(S9~S15)最高(在秋季和夏季分别为 171.5 $\mu g \cdot kg^{-1}$ 和 68.85 $\mu g \cdot kg^{-1}$),而其他区域较低,可能与生物医药企业的分布有关. 制药企业产生的含大量抗生素的废水在污水厂未能被完全有效去除而进行排放或农业灌溉可导致抗生素最终进入土壤环境中,最终导致土壤中抗生素含量的升高.

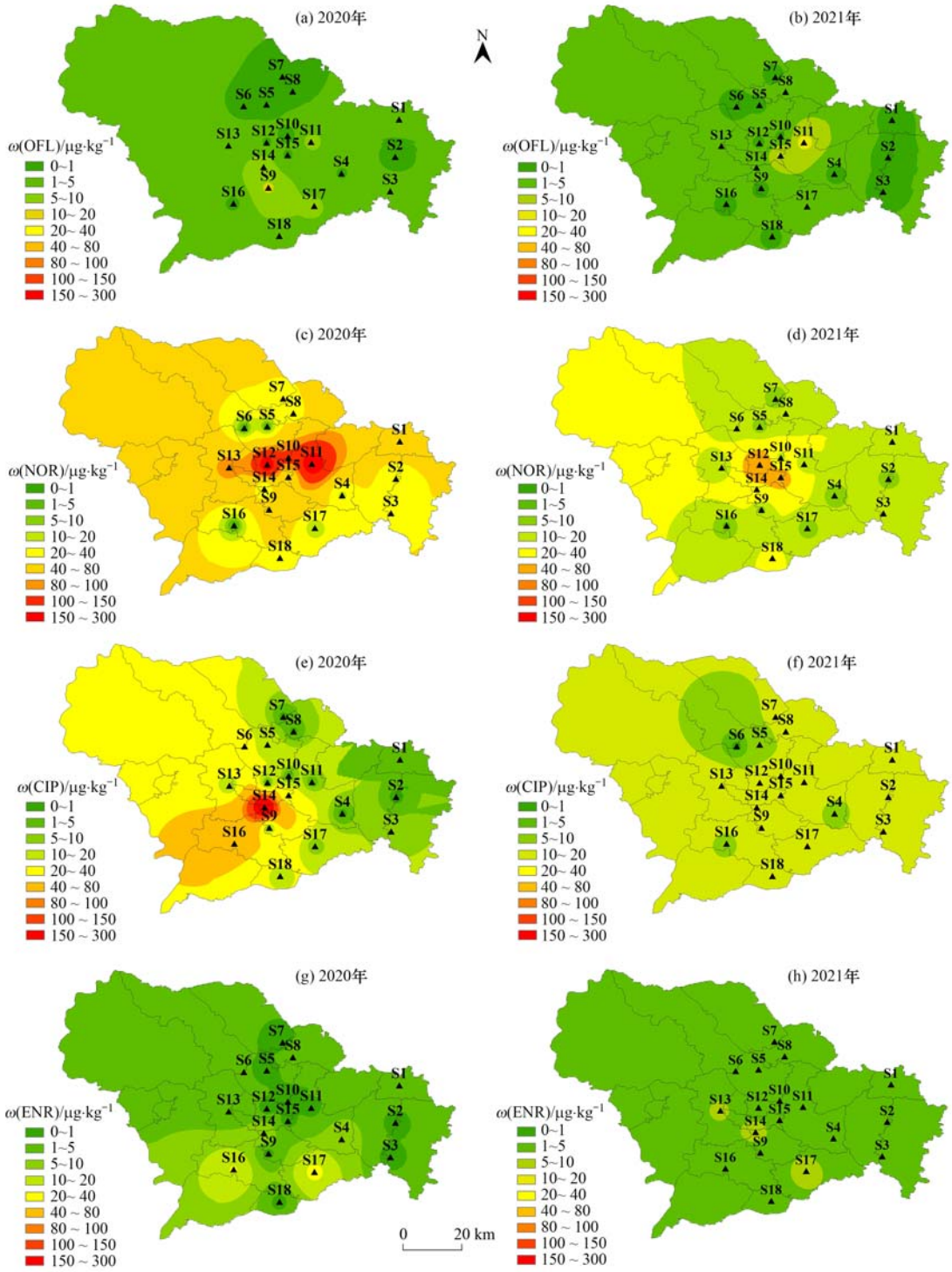
2.2 土壤理化因子的时空分布特征

石家庄市土壤中理化因子的时空分布特征见图 3. 其中土壤粒径占比为数量占比. 由图 3(a)和图 3(b)可知,从 2020 年 9 月至 2021 年 6 月,粉粒占比并无显著变化(平均占比分别为 77.8%和 81.8%),砂粒占比降低(平均占比分别为 17.8%和 9.41%),而黏粒占比升高(平均占比分别为 4.42%和 8.76%). 由图 3(c)和图 3(d)可知,ω(NH_4^+-N)、ω(NO_3^--N)和 ω(TP)平均值均呈降低趋势,分别由 17.79、64.31 和 715.8 $mg \cdot kg^{-1}$ 降低为 8.141、12.70 和 670.7 $mg \cdot kg^{-1}$. 可能是由于气候原因,夏季较高的降水量和雨水冲刷导致土壤中黏粒增多而砂粒和 TP 含量降低,夏季植物生长旺盛大量吸收 NH_4^+-N和NO_3^--N导致其含量降低.

2.3 QNs 与土壤理化因子相关性

为探究土壤理化因子对 QNs 的时空分布特征的影响,通过 Pearson 分析对 QNs 和理化因子进行

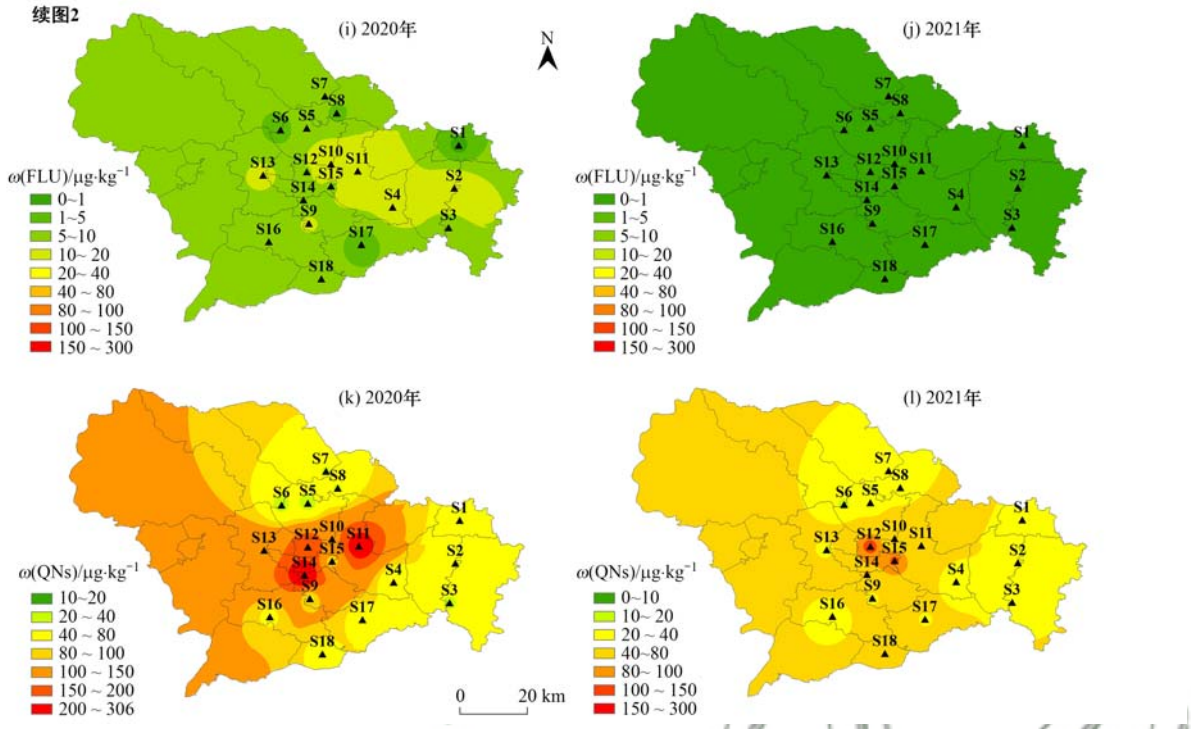
了相关性分析(图 4). 结果表明,2020 年 9 月,NOR 与NO_2^--N和NO_3^--N显著正相关($P<0.05$);FLU 与NO_3^--N显著正相关($P<0.05$);CIP 和总 QNs 均与粉粒显著正相关($P<0.05$),而与砂粒呈显著负相关($P<0.05$). 2021 年 6 月,OFL 与黏粒显著正相关($P<0.05$),而与砂粒显著负相关($P<0.05$);FLU 与粉粒显著正相关($P<0.05$),而与砂粒显著负相关($P<0.05$). 这表明粒径越小越有利于土壤颗粒对抗生素的吸附. 此外,NO_2^--N和NO_3^--N也是 QNs 的时空分布特征的重要影响因素. 土壤中 QNs 的时空分布特征受土壤粒径、NO_2^--N和NO_3^--N等 3 种理化因子的共同影响.



(a)、(c)、(e)、(g)、(i)和(k)分别为 2020 年 9 月(秋季)OFL、NOR、CIP、ENR、FLU 和总 QNs 含量的空间分布;(b)、(d)、(f)、(h)、(j)和(l)分别为 2021 年 6 月(夏季) OFL、NOR、CIP、ENR、FLU 和总 QNs 含量的空间分布

图 2　石家庄市土壤中典型 QNs 的时空分布

Fig. 2　Temporal and spatial distribution of typical QNs in soil of Shijiazhuang City



2.4 石家庄市土壤中 QNs 风险评估

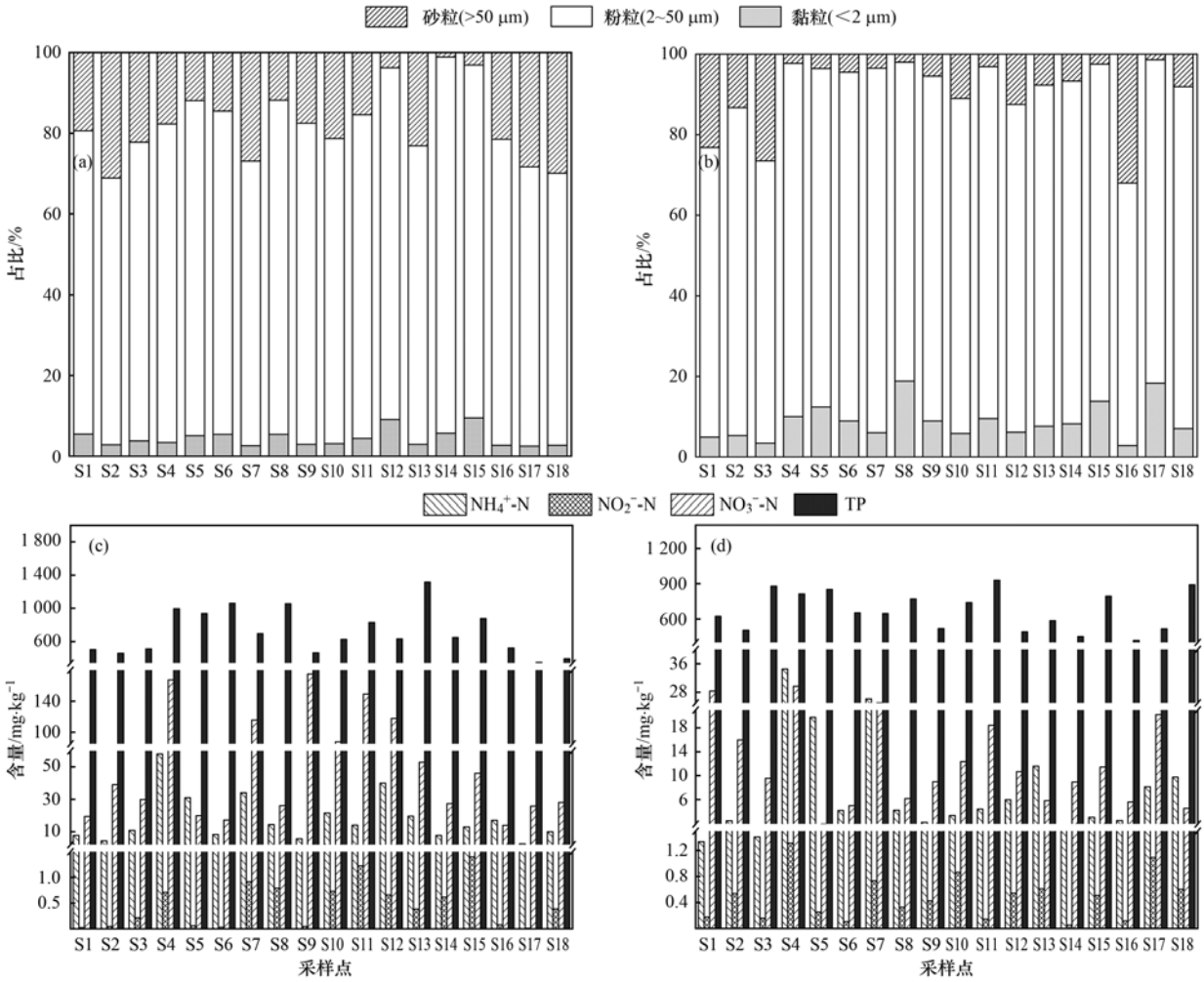
5 种典型 QNs 的生态风险 RQ 值见图 5. 从 2020 年 9 月至 2021 年 6 月,联合生态风险 RQ_{sum} 平均值由 3.79 降低为 1.73,RQ_{sum} 值在秋季和夏季的范围分别为 0.8 ~ 23.66 和 0.51 ~ 3.65. 就具体 QNs 的生态风险而言,以 RQ_{NOR} 和 RQ_{CIP} 最高. RQ_{NOR} 平均值由 1.92(秋季)降低为 0.59(夏季),RQ_{CIP} 的平均值由 2.94(秋季)降低为 1.74(夏季). NOR 和 CIP 在秋季分别有 83.33% 和 66.67% 的土壤样品为中高生态风险(RQ > 0.1),在夏季分别有 100% 和 94.44% 的土壤样品为中高生态风险(RQ > 0.1). 较秋季而言,夏季的生态风险 RQ 值整体降低. 在 S9 ~ S15(中部)生态风险最高,整体呈中部地区高而其他区域低的空间特征,与土壤中 QNs 含量的时空变化特征相一致. 石家庄市在秋季和夏季分别有 83.33% 和 77.78% 的土壤样品属于高生态风险水平(RQ_{sum} > 1),应引起重视.

5 种典型 QNs 的抗性风险 RQ 值见图 6. 2020 年 9 月至 2021 年 6 月,联合抗性风险 RQ_{sum} 平均值呈降低趋势(0.82 和 0.40),在秋季和夏季的 RQ_{sum} 值范围分别为 0.13 ~ 6.26 和 0.11 ~ 0.75. 就具体 QNs 的抗性风险而言,RQ_{OFL}、RQ_{NOR}、RQ_{CIP}、RQ_{ENR} 和 RQ_{FLU} 的均值均呈降低趋势,分别由 0.004、0.199、0.521、0.074 和 0.023 降低为 0.003、0.073、0.259、0.062 和 0.001. 抗性风险商值的时空变化特征与生态风险相一致. 其中在 S9 ~ S15(中部)联合抗性风险商最高(秋季 RQ_{sum} > 0.4,夏季 RQ_{sum} > 0.3),虽显著低于生态风险,但 100.0% 的土壤样品表现为中高抗性风险水平(RQ_{sum} > 0.1)和中风险水平(0.1 < RQ_{sum} ≤ 1),因此 QNs 产生的抗性风险也不容忽视.

3 讨论

3.1 土壤中抗生素的时空分布特征

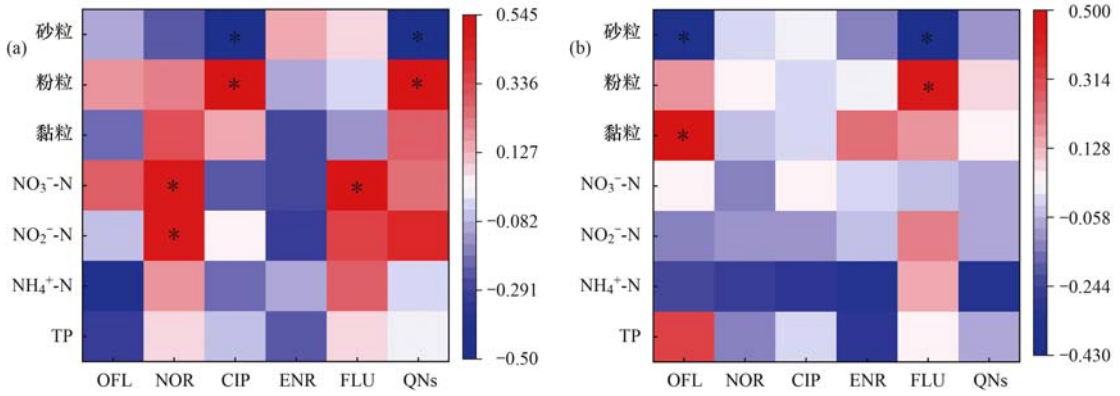
就空间分布而言,石家庄市中部土壤中 QNs 含量显著较高而其他区域较低,这与此前研究结果相一致[32]. 有研究发现,制药企业附近土壤中 QNs 含量高于其他区域[47],且土壤中 QNs 含量可能随着人类活动强度的增强而升高[48,49]. 石家庄市中部制药企业发达,且建设用地较多,人类活动强度较高. 因此中部土壤中 QNs 含量可能受制药企业和人类活动的影响较大. 除制药厂废水可能产生的影响外,制药厂污泥中抗生素含量更高,吸附了大量抗生素的活性污泥未经深度有效处理最终施用于土壤会导致附近土壤中抗生素含量的升高[6]. 如 Lindberg 等[50]通过研究发现污水厂排放污泥中 NOR 和 CIP 的含量分别为出水的 21.8 倍和 22.8 倍. 此外,土地利用类型和土壤类型的差异也会导致抗生素含量的分布的差异[51,52]. 整体而言,石家庄市秋季土壤中 ω(QNs)平均值(94.88 μg·kg⁻¹)高于沈阳(24.13 μg·kg⁻¹)、北京(49.70 μg·kg⁻¹)、天津(33.56 μg·kg⁻¹)、宁波(8.970 μg·kg⁻¹)、广州(48.85 μg·kg⁻¹)和南京(50.88 μg·kg⁻¹)等地[47,53~57],整体属于中高污染水平,应引起重视. 目前我国对土壤中抗生素的研究多集中于其空间分布特征,而季节变化规律的研究较少. QNs 比其他种类抗生素更容



(a)2020 年 9 月(秋季)土壤粒径的空间分布,(b)2021 年 6 月(夏季)土壤粒径的空间分布,
(c)2020 年 9 月(秋季)土壤主要理化因子的空间分布,(d)2021 年 6 月(夏季)土壤主要理化因子的空间分布

图 3　石家庄市土壤理化因子的时空分布特征

Fig. 3　Spatial distribution characteristics of soil physical and chemical factors in Shijiazhuang City



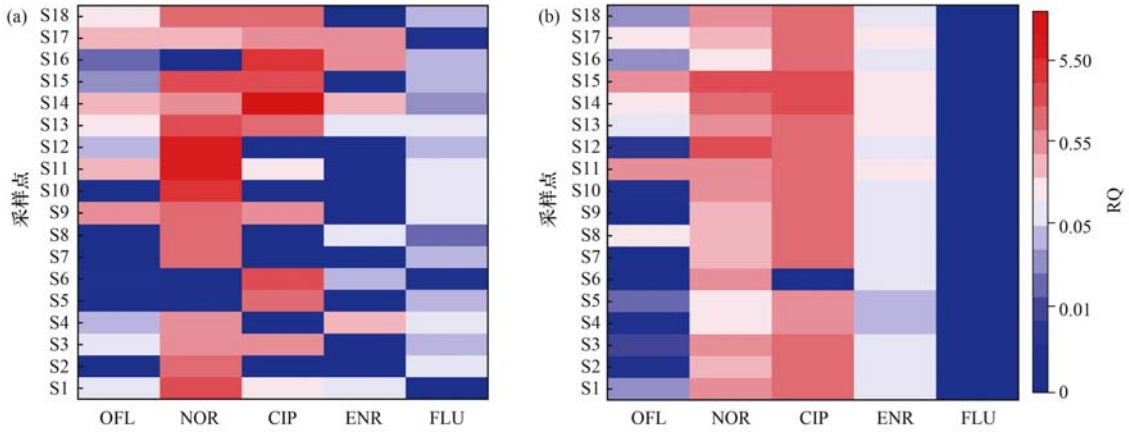
(a)2020 年 9 月 QNs 与理化因子相关性;(b)2021 年 6 月 QNs 与理化因子相关性;

* 表示 $P<0.05$,当相关性系数为正数时表示为正相关,反之为负相关

图 4　石家庄市土壤中 QNs 与土壤理化因子的 Pearson 分析

Fig. 4　Pearson analysis of QNs and soil physical and chemical factors in Shijiazhuang City

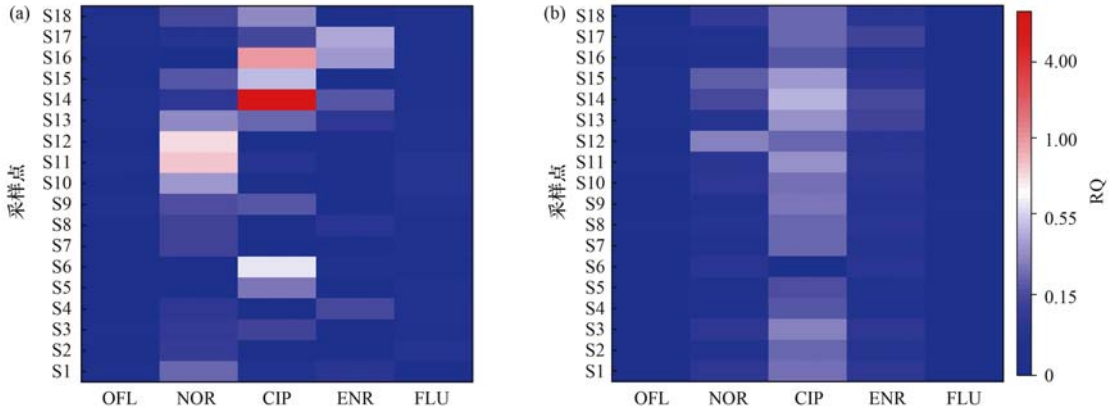
易受到季节因素的影响[58]. 就季节变化而言,石家庄市表层土壤中 QNs 的检出含量夏季低而秋季高,这可能与气候条件的变化有关. 夏季强降雨较多,加速了抗生素的垂向迁移[59],而秋季降雨量减少,抗生素集中吸附在表层土壤中[60],导致在旱季表层土壤中抗生素含量显著高于雨季. 此外,土壤中 QNs 的含量还可能与温度变化有关. 温度越低土壤对抗生素的吸附能力越强[61],因此由夏季转入秋季后,



(a)2020 年 9 月(秋季)生态风险 RQ,(b) 2021 年 6 月(夏季)生态风险 RQ

图 5 石家庄市土壤中典型 QNs 的生态风险

Fig. 5 Ecological risk of typical QNs in soil of Shijiazhuang City



(a)2020 年 9 月(秋季)抗性风险 RQ,(b) 2021 年 6 月(夏季)抗性风险 RQ

图 6 石家庄市土壤中典型 QNs 抗性风险

Fig. 6 Resistance risk of typical QNs in soil of Shijiazhuang City

温度的下降导致土壤对抗生素的吸附作用增强,进而导致土壤中 QNs 含量的升高.

3.2 土壤中抗生素的影响因素

就理化影响因子而言,本研究中 QNs 与土壤粒径、NO_2^--N和NO_3^--N等 3 种理化因子呈显著相关性($P<0.05$),说明抗生素在土壤中的分布同时受多种环境因子的共同影响. 其中土壤粒径属于重要影响因素之一. 土壤粒径越小,比表面积越大,对抗生素的吸附量越高. 当土壤中黏粒含量升高时,对抗生素的吸附能力增强[62,63]. 而砂粒含量越高,吸附能力较弱的抗生素的迁移能力增强. 本研究中 QNs 与粉粒及黏粒正相关,而与砂粒负相关,这与已有研究的结果一致[63,64]. 土壤溶液阴离子也会影响抗生素在土壤中的含量,主要通过影响其在土壤中的吸附性能来实现[15,65,66]. 本研究中 QNs 与 NO_2^--N 和 NO_3^--N呈显著正相关($P<0.05$),可能由于 NO_2^- 和 NO_3^- 与 QNs 阳离子基团相结合而增强了其在土壤中的吸附. 此外,pH、重金属离子和土壤有机质含量也被证实是影响土壤中抗生素含量的重要影响因素. 因此,除抗生素的生产和使用量及季节气候条件变化(温度、降雨量)等宏观因素外,石家庄市土壤中 QNs 含量的时空分布特征还受到土壤粒径、NO_2^--N和NO_3^--N等理化因子的共同影响.

3.3 土壤中抗生素的风险评估

就具体 QNs 的生态风险而言,NOR 和 CIP 在秋季的高风险土壤样品占比分别为 44.44% 和 33.33%,显著高于长三角地区、山西汾河沿岸、北京和广州蔬菜基地土壤[49,67~69]. 相较于国内其他地区,石家庄市土壤中 QNs 的联合生态风险属于较高生态风险水平($RQ_{sum}>1$),应引起重视. 风险商值法(RQs)多用于抗生素生态风险评估,本研究利用其对土壤中 QNs 进行了抗性风险评估,为抗生素风险评估提供了又一方法支撑. 且本研究中 QNs 的联合抗性风险属于中风险水平($0.1<RQ_{sum}\leqslant 1$). 抗性风险水平越高,表明耐药菌和耐药性遗传元件产生与传播的几率越大. 因此,应进一步加强对石家庄市土壤中抗生素的风险防控和治理. 抗生素的风险水平与抗生素含量直接相关,为降低石家庄市土壤中 QNs 的生

态风险和抗性风险，主要可通过从源头上严格控制生物制药领域和水产、畜禽养殖领域中抗生素产品的生产及使用量、增强污水厂污泥和污水中的抗生素处理工艺和减少农业土壤中的粪肥施用来实现.

4　结论

（1）就空间分布而言，土壤中 QNs 最大含量出现在中部地区，而其他区域含量较低；就季节变化而言，由 2020 年 9 月（秋季）至 2021 年 6 月（夏季），土壤中 QNs 含量呈降低趋势. 整体而言，土壤中 QNs 在秋季和夏季为中高污染水平.

（2）与秋季相比，夏季的砂粒占比、NH_4^+-N、NO_3^--N和 TP 含量平均值均呈下降趋势，而黏粒占比平均值呈升高趋势.

（3）土壤中 QNs 的时空分布特征与土壤粒径、NO_2^--N和NO_3^--N显著相关，说明 QNs 的时空分布特征受 3 种土壤理化因子的共同影响.

（4）就具体 QNs 而言，以 NOR 和 CIP 的生态风险和抗性风险最高；就季节变化而言，夏季的风险较秋季呈降低趋势；就空间变化而言，中部地区风险最高. 整体而言，石家庄土壤中 QNs 的联合生态风险和联合抗性风险分别为中高风险水平和中等风险水平.

参考文献：

[1] Kumar M, Dhangar K, Thakur A K, *et al*. Antidrug resistance in the Indian ambient waters of ahmedabad during the COVID-19 Pandemic[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126125.

[2] Carvalho I T, Santos L. Antibiotics in the aquatic environments: a review of the European scenario [J]. Environment International, 2016, **94**: 736-757.

[3] 蓝贤瑾, 刘益仁, 吕真真, 等. 氟喹诺酮类抗生素在我国农田土壤中残留及其风险研究进展[J]. 江西农业学报, 2019, **31**(9): 108-115.
Lan X J, Liu Y R, Lv Z Z, *et al*. Research advance in residues and ecological risks of fluoroquinolone antibiotics in agricultural soil in China[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, **31**(9): 108-115.

[4] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, *et al*. Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(11): 6772-6782.

[5] 伊丽丽, 焦文涛, 陈卫平. 不同抗生素在剖面土壤中的吸附特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(12): 2357-2363.
Yi L L, Jiao W T, Chen W P. Adsorption characteristics of three types of antibiotics in the soil profiles [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(12): 2357-2363.

[6] 王冲, 罗义, 毛大庆. 土壤环境中抗生素的来源、转归、生态风险以及消减对策[J]. 环境化学, 2014, **33**(1): 19-29.
Wang C, Luo Y, Mao D Q. Sources, fate, ecological risks and mitigation strategies of antibiotics in the soil environment[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(1): 19-29.

[7] Rutgersson C, Fick J, Marathe N, *et al*. Fluoroquinolones and *qnr* genes in sediment, water, soil, and human fecal flora in an environment polluted by manufacturing discharges [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(14): 7825-7832.

[8] Tasho R P, Cho J Y. Veterinary antibiotics in animal waste, its distribution in soil and uptake by plants: a review[J]. Science of the Total Environment, 2016, **563-564**: 366-376.

[9] Srinivasan P, Sarmah A K, Manley-Harris M. Sorption of selected veterinary antibiotics onto dairy farming soils of contrasting nature[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 695-703.

[10] 张劲强, 董元华. 诺氟沙星在 4 种土壤中的吸附-解吸特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2134-2140.
Zhang J Q, Dong Y H. Adsorption and desorption of Norfloxacin on four typical soils in China[J]. Environmental Science, 2007, **28**(9): 2134-2140.

[11] Bondarczuk K, Markowicz A, Piotrowska-Seget Z. The urgent need for risk assessment on the antibiotic resistance spread via sewage sludge land application[J]. Environment International, 2016, **87**: 49-55.

[12] 裴浩鹏, 徐艳, 陈蕊, 等. 天津市城郊不同土地利用类型土壤中抗生素分布特征及影响因素分析[J]. 环境工程, 2021, **39**(1): 166-173.
Pei H P, Xu Y, Chen R, *et al*. Distribution characteristics and influencing factors of antibiotics in soils of different land use types in suburbs of Tianjin[J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(1): 166-173.

[13] Gao L H, Shi Y L, Li W H, *et al*. Occurrence and distribution of antibiotics in urban soil in Beijing and Shanghai, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(15): 11360-11371.

[14] Zhi D, Yang D X, Zheng Y X, *et al*. Current progress in the adsorption, transport and biodegradation of antibiotics in soil[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **251**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109598.

[15] 提清清, 高增文, 季慧慧, 等. 抗生素在土壤中的吸附行为研究进展[J]. 土壤, 2017, **49**(3): 437-445.
Ti Q Q, Gao Z W, Ji H H, *et al*. Adsorption of antibiotics in soils: a review[J]. Soils, 2017, **49**(3): 437-445.

[16] Pan B, Wang P, Wu M, *et al*. Sorption kinetics of ofloxacin in soils and mineral particles[J]. Environmental Pollution, 2012, **171**: 185-190.

[17] 何玉洁, 周凯萍, 饶怡璇, 等. 土壤中抗生素的环境风险及污染土壤的生物修复技术[J]. 生物工程学报, 2021, **37**(10): 3487-3504.
He Y J, Zhou K P, Rao Y X, *et al*. Environmental risks of antibiotics in soil and the related bioremediation technologies[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, **37**(10): 3487-3504.

[18] Mukhtar A, Manzoor M, Gul I, *et al*. Phytotoxicity of different antibiotics to rice and stress alleviation upon application of organic amendments[J]. Chemosphere, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127353.

[19] Opris O, Copaciu F, Soran M L, *et al*. Influence of nine antibiotics on key secondary metabolites and physiological characteristics in *Triticum aestivum*: leaf volatiles as a promising new tool to assess toxicity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **87**: 70-79.

[20] Zhao F K, Yang L, Li G, *et al*. Veterinary antibiotics can reduce crop yields by modifying soil bacterial community and earthworm population in agro-ecosystems [J]. Science of the

Total Environment, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152056.

[21] Zhang R J, Xu X M, Jia D T, *et al*. Sediments alleviate the inhibition effects of antibiotics on denitrification: functional gene, microbial community, and antibiotic resistance gene analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, **804**, doi: 10.1016/J.scitotenv.2021.150092.

[22] Wang J, Liu X H, Dai Y X, *et al*. Effects of co-loading of polyethylene microplastics and ciprofloxacin on the antibiotic degradation efficiency and microbial community structure in soil [J]. Science of the Total Environment, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140463.

[23] 徐慕, 李世豪, 马巾, 等. 上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5848-5856.
Xu M, Li S H, Ma J, *et al*. Investigation on fluoroquinolone resistance genes in the intensive aquaculture area of Shatianhu intensive aquiculture farm and surrounding waterbodies in Shanghai, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5848-5856.

[24] 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 等. 宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4166-4178.
Shen C, Zhang J H, Liu J L, *et al*. Distribution characteristics of antibiotics and antibiotic resistance genes in manure and surrounding soil of poultry farm in Ningxia[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4166-4178.

[25] 周雨婷. 中国农田土壤中抗生素抗性基因分布及典型污染物浓度特征、对其影响与风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhou Y T. Distribution of antibiotic resistance genes and concentration characteristics, influence on antibiotic resistance genes, and risk assessments of typical pollutants in agricultural soils in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[26] 程建华, 唐翔宇, 刘琛. 紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3257-3262.
Cheng J H, Tang X Y, Liu C. Characteristics of antibiotic resistance genes in various livestock feedlot soils of the hilly purple soil region[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3257-3262.

[27] 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 等. 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2981-2991.
Zhang J H, Chen R H, Liu J L, *et al*. Distribution characteristics of antibiotics and antibiotic resistance genes in manure and surrounding soil of cattle farms in Ningxia[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2981-2991.

[28] Zhu D, Xiang Q, Yang X R, *et al*. Trophic Transfer of antibiotic resistance genes in a soil detritus food chain[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(13): 7770-7781.

[29] 郭冬冬. 石家庄生物医药产业园有效集聚的推进对策研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018.
Guo D D. Research on solutions to facilitate effective industrial clusters in Shijiazhuang biomedical industrial park [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2018.

[30] 高银珍. 石家庄市生物医药产业集群竞争力评价与提升研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
Gao Y Z. Research on Evaluation and promotion of the cluster competitiveness of biomedicine industry in Shijiazhuang[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2018.

[31] 王彦茹. 石家庄市生物医药产业集聚现状[J]. 企业导报, 2015, (12): 64, 66.

[32] 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 等. 石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4684-4696.
Zhao X Y, Ju Z J, Chen H, *et al*. Spatial distribution of quinolone antibiotics and its correlation relationship with microbial community in soil of Shijiazhuang city [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4684-4696.

[33] 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 等. 喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4543-4555.
Ju Z J, Fu Y, Zhao X Y, *et al*. Distribution coefficient of QNs in urban typical water and its main environmental influencing factors [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4543-4555.

[34] Zhao F K, Yang L, Chen L D, *et al*. Soil contamination with antibiotics in a typical peri-urban area in eastern China: seasonal variation, risk assessment, and microbial responses[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **79**: 200-212.

[35] Chen H Y, Jing L J, Teng Y G, *et al*. Characterization of antibiotics in a large-scale river system of China: Occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks[J]. Science of the Total Environment, 2018, **618**: 409-418.

[36] 张小红, 陶红, 王亚娟, 等. 银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4933-4941.
Zhang X H, Tao H, Wang Y J, *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of tetracycline antibiotics in farmland soil in Yinchuan[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4933-4941.

[37] Zhi S L, Shen S Z, Zhou J, *et al*. Systematic analysis of occurrence, density and ecological risks of 45 veterinary antibiotics: focused on family livestock farms in Erhai Lake basin, Yunnan, China [J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115539.

[38] Li Y X, Zhang X L, Li W, *et al*. The residues and environmental risks of multiple veterinary antibiotics in animal faeces[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(3): 2211-2220.

[39] Riaz L, Mahmood T, Khalid A, *et al*. Fluoroquinolones (FQs) in the environment: a review on their abundance, sorption and toxicity in soil[J]. Chemosphere, 2018, **191**: 704-720.

[40] Tolls J. Sorption of veterinary pharmaceuticals in soils: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(17): 3397-3406.

[41] Leal R M P, Alleoni L R F, Tornisielo V L, *et al*. Sorption of fluoroquinolones and sulfonamides in 13 Brazilian soils [J]. Chemosphere, 2013, **92**(8): 979-985.

[42] Pan M, Chu L M. Adsorption and degradation of five selected antibiotics in agricultural soil [J]. Science of the Total Environment, 2016, **545-546**: 48-56.

[43] Conkle J L, Lattao C, White J R, *et al*. Competitive sorption and desorption behavior for three fluoroquinolone antibiotics in a wastewater treatment wetland soil[J]. Chemosphere, 2010, **80**(11): 1353-1359.

[44] Sturini M, Speltini A, Maraschi F, *et al*. Sunlight-induced degradation of soil-adsorbed veterinary antimicrobials Marbofloxacin and Enrofloxacin[J]. Chemosphere, 2012, **86**(2): 130-137.

[45] Yang Y Y, Owino AA, Gao Y, *et al*. Occurrence, composition and risk assessment of antibiotics in soils from Kenya, Africa

[J]. Ecotoxicology, 2016, **25**(6): 1194-1201.

[46] Bengtsson-Palme J, Larsson D G J. Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria: proposed limits for environmental regulation[J]. Environment International, 2016, **86**: 140-149.

[47] 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 等. 北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4257-4266.
Su S H, He J T, Yang L, *et al*. Contamination characteristics of fluoroquinolones in different kinds of soil profiles in southeast suburb of Beijing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4257-4266.

[48] 赵方凯, 杨磊, 李守娟, 等. 长三角典型城郊土壤抗生素空间分布的影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1163-1171.
Zhao F K, Yang L, Li S J, *et al*. Affecting factors of the spatial distribution of antibiotics in soils in typical periurban area of Yangtze River Delta[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1163-1171.

[49] 朱宇恩, 苗佳蕊, 郑静怡, 等. 汾河沿岸农田土壤喹诺酮类抗生素残留特征及风险评估[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(6): 1989-1998.
Zhu Y E, Miao J R, Zheng J Y, *et al*. Residual characteristics and risk assessment of quinolones in agricultural soil along the Fenhe River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(6): 1989-1998.

[50] Lindberg R H, Olofsson U, Rendahl P, *et al*. Behavior of fluoroquinolones and trimethoprim during mechanical, chemical, and active sludge treatment of sewage water and digestion of sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(3): 1042-1048.

[51] 张笑归, 宁国辉, 刘树庆, 等. 张家口葡萄产区土壤抗生素含量及其潜在生态环境风险评价[J]. 华北农学报, 2011, **26**(S1): 146-151.
Zhang X G, Ning G H, Liu S Q, *et al*. Study on eco-environment risk assessment of antibiotics concentrations in soil and environment in the grapes region of Zhangjiakou[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, **26**(S1): 146-151.

[52] Gu J Y, Chen C Y, Huang X Y, *et al*. Occurrence and risk assessment of tetracycline antibiotics in soils and vegetables from vegetable fields in Pearl River Delta, South China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145959.

[53] Xu Y G, Yu W T, Ma Q, *et al*. Occurrence of (fluoro) quinolones and (fluoro) quinolone resistance in soil receiving swine manure for 11 years[J]. Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 191-197.

[54] Shi Y L, Gao L H, Li W H, *et al*. Investigation of fluoroquinolones, sulfonamides and macrolides in long-term wastewater irrigation soil in Tianjin, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **89**(4): 857-861.

[55] Zhang H B, Zhou Y, Huang Y J, *et al*. Residues and risks of veterinary antibiotics in protected vegetable soils following application of different manures[J]. Chemosphere, 2016, **152**: 229-237.

[56] 郜义萍, 莫测辉, 吴小莲, 等. 绿色和有机蔬菜基地土壤中喹诺酮类抗生素的污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 125-130.
Tai Y P, Mo C H, Wu X L, *et al*. Occurrence of quinolone antibiotics in the soils from a green and an organic vegetable fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(1): 125-130.

[57] 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 等. 长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5237-5246.
Zhao F K, Chen L D, Yang L, *et al*. Composition and distribution of antibiotics in soils with different land use types in a typical peri-urban area of the Yangtze river delta[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5237-5246.

[58] Zhang Z B, Duan Y P, Zhang Z J, *et al*. Multimedia fate model and risk assessment of typical antibiotics in the integrated demonstration zone of the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, **805**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150258.

[59] 贺德春, 许振成, 吴根义, 等. 施用粪肥菜地中四环素类抗生素的迁移特征[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 32-36.
He D C, Xu Z C, Wu G Y, *et al*. Tetracycline antibiotics transport in leachate and surface run-off from manure-amended agricultural soil[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 32-36.

[60] Zhao F K, Chen L D, Yang L, *et al*. Effects of land use and rainfall on sequestration of veterinary antibiotics in soils at the hillslope scale[J]. Environmental Pollution, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114112.

[61] 瞿旭. 畜禽养殖区土壤中抗生素污染特征与垂向迁移机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
Qu X. Study on the pollution characteristics and vertical migration mechanism of antibiotics in soil of livestock and poultry breeding areas[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[62] Chessa L, Pusino A, Garau G, *et al*. Soil microbial response to tetracycline in two different soils amended with cow manure[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(6): 5807-5817.

[63] 陈淼, 俞花美, 葛成军, 等. 环丙沙星在热带土壤中的吸附-解吸特征研究[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(2): 38-42, 49.
Chen M, Yu H M, Ge C J, *et al*. Studied on the ciprofloxacin adsorption-desorption characteristics of three tropical soils[J]. Environmental Pollution & Control, 2013, **35**(2): 38-42, 49.

[64] Zhang Y P, Sallach J B, Hodges L, *et al*. Effects of soil texture and drought stress on the uptake of antibiotics and the internalization of *Salmonella* in lettuce following wastewater irrigation[J]. Environmental Pollution, 2016, **208**: 523-531.

[65] Qin X P, Liu F, Wang G C, *et al*. Modeling of levofloxacin adsorption to goethite and the competition with phosphate[J]. Chemosphere, 2014, **111**: 283-290.

[66] Paul T, Machesky M L, Strathmann T J. Surface complexation of the zwitterionic fluoroquinolone antibiotic ofloxacin to nano-anatase TiO_2 photocatalyst surfaces[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(21): 11896-11904.

[67] Wu X L, Xiang L, Yan Q Y, *et al*. Distribution and risk assessment of quinolone antibiotics in the soils from organic vegetable farms of a subtropical city, Southern China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **487**: 399-406.

[68] Li C, Chen J Y, Wang J H, *et al*. Occurrence of antibiotics in soils and manures from greenhouse vegetable production bases of Beijing, China and an associated risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2015, **521-522**: 101-107.

[69] Sun J T, Zeng Q T, Tsang D C W, *et al*. Antibiotics in the agricultural soils from the Yangtze River delta, China[J]. Chemosphere, 2017, **189**: 301-308.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 4

Apr. 15, 2023

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China ····· HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, *et al.* (1801)

Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter ····· WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, *et al.* (1811)

Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain ····· ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, *et al.* (1821)

Spatiotemporal Evolution Characteristics of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020 ····· NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, *et al.* (1830)

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of $PM_{2.5}$ and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021 ····· SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, *et al.* (1841)

Spatio-temporal Variation in $PM_{2.5}$ Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, *et al.* (1852)

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing ····· ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, *et al.* (1865)

Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing ····· LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)

Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter $PM_{2.5}$ Over Xi'an ····· LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, *et al.* (1882)

Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{10} and $PM_{2.5}$ from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels ····· WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, *et al.* (1890)

Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in the Core Area of Ili River Valley in Spring ····· GU Chao, XU Tao, MA Chao, *et al.* (1899)

Evaluation of Changes in $PM_{2.5}$ Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids ····· LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, *et al.* (1911)

Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration ····· LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, *et al.* (1924)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City ····· SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, *et al.* (1933)

Changes in O_3-VOCs-NO_x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021 ····· LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, *et al.* (1943)

Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer ····· ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, *et al.* (1954)

Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao ····· JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, *et al.* (1962)

Characteristics of O_3 Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical ····· YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, *et al.* (1974)

Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect ····· LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)

Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing ····· YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, *et al.* (1998)

Simulation of Anthropogenic CO_2 Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories ····· MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, *et al.* (2009)

Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source ····· ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, *et al.* (2022)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River ····· LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, *et al.* (2032)

Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China ····· WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, *et al.* (2040)

Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes ····· XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, *et al.* (2052)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin ····· LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, *et al.* (2062)

Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin ····· ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, *et al.* (2072)

Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area ····· JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, *et al.* (2083)

Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan ····· ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, *et al.* (2093)

Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats ····· HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)

Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water ····· WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, *et al.* (2113)

Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in *Sinularia microclavata* ····· LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, *et al.* (2122)

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai ····· YAN Qi (2136)

Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar ····· LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, *et al.* (2147)

Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics ····· LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, *et al.* (2158)

Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation ····· XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)

Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data ····· ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, *et al.* (2177)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model ····· MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, *et al.* (2192)

Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter ····· HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, *et al.* (2204)

Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network ····· MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, *et al.* (2215)

Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City ····· ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, *et al.* (2223)

Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background ····· DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, *et al.* (2234)

Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize ····· DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, *et al.* (2243)

Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City ····· WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)

Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis ····· LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, *et al.* (2265)

Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau ····· LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, *et al.* (2275)

Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains ····· JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, *et al.* (2283)

Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River ····· YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, *et al.* (2293)

Diversity and Predictive Functional of *Caragana jubata* Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes ····· LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, *et al.* (2304)

Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest ····· WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, *et al.* (2315)

Effects of Phosphogypsum and *Suaeda salsa* on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil ····· LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, *et al.* (2325)

Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil ····· GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, *et al.* (2338)

Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields ····· HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, *et al.* (2348)

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress ····· CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, *et al.* (2356)

Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035 ····· FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, *et al.* (2365)

Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil ····· BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, *et al.* (2375)

Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils ····· HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, *et al.* (2384)

Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China ····· LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, *et al.* (2395)